

## 다목적 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 설계

### Design of Fuzzy Controller using Multi-objective Genetic Algorithm

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

P. N. Roschke\*\*

이 동 근\*\*\*  
Lee, Dong-Guen

---

#### ABSTRACT

The controller that can control the smart base isolation system consisting of MR damper and friction pendulum systems(FPS) is developed in this study. A fuzzy logic controller (FLC) is used to modulate the MR damper force because the FLC has an inherent robustness and ability to handle non-linearities and uncertainties. A genetic algorithm (GA) is used for optimization of the FLC. When earthquake excitations are applied to the structures equipped with smart base isolation system, the relative displacement at the isolation level as well as the acceleration of the structure should be regulated under appropriate level. Thus, NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) is employed in this study as a multi-objective genetic algorithm to meet more than two control objectives, simultaneously. NSGA-II is used to determine appropriate fuzzy control rules as well to adjust parameters of the membership functions. Effectiveness of the proposed method for optimal design of the FLC is judged based on computed responses to several historical earthquakes. It has been shown that the proposed method can efficiently find Pareto optimal sets that can reduce both structural acceleration and base drift from numerical studies.

---

#### 1. 서론

근래에 들어와서 지진하중과 같은 큰 하중에 의해서 발생하는 구조물의 피해를 줄일 수 있는 새로운 시스템으로 스마트 면진기술이 널리 연구되고 있다. 최근에 이루어진 스마트 면진장치의 성능연구에 의하면 수동 면진장치를 적용하였을 때 발생하는 상부구조물의 가속도의 증가없이 면진층의 변위를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 능동이나 준능동장치를 이용하면 상부구조물의 응답을 증가시키지 않고 면진층의 변위를 적절하게 제어할 수 있다고 알려져 있다. 퍼지제어를 사용한 진동제어기법은 최근 몇 년 동안 구조엔지니어들의 많은 관심을 끌고 있다.<sup>(1),(2)</sup> 전통적인 제어이론의 대안으로서 FLC는 복잡하고 불확실하며 애매한 조건 아래서 적용되어야 하는 시스템에 매우 적합하다. 특히 고유의 건실성(robustness)과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 본 연구에서는 하이브리드 면진장치의 핵심 구성요

---

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사후연구원

\*\* Professor, Department of civil engineering, Texas A&M University, U.S.A

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

소인 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 FLC를 사용한다. 비록 FLC가 수많은 구조시스템을 제어하는데 이용되어 왔지만 적합한 퍼지 소속함수(membership function)를 선택하고 퍼지제어규칙을 찾아내는 일은 시간이 많이 소요되는 쉽지 않은 작업이다. 따라서 본 연구에서는 GA를 사용하여 소속함수의 최적화뿐만 아니라 적절한 제어규칙을 찾는 데 중점을 두고 있다.

구조엔지니어는 구조물의 안전성과 거주자의 사용성을 동시에 보장할 수 있도록 구조물을 설계해야 한다. 일반적으로 구조물의 안전성은 외부하중에 대한 구조물의 변위응답에 관계되고 사용성은 가속도응답에 의하여 결정된다. 그러나 첫 번째 목적인 변위의 저감은 두 번째 목적인 가속도의 저감과 일반적으로 상충된다. 이러한 문제는 파레토 최적해 집합을 구할 수 있는 다목적 최적화방법으로 해결할 수 있다. GA는 다수의 개체를 이용하여 최적화 문제를 해결하는 특징이 있기 때문에 다목적 최적화문제에 적합한 방법이다. 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 이용하였다.

## 2. 다목적 최적화

다목적 최적화는 여러 개의 성능지표에 대하여 동시에 좋은 성능을 발휘할 수 있는 최적해를 찾는 것이다. 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 서로 상충한다는 것이다.<sup>(3)</sup> 즉, 모든 목적에 대하여 동시에 최대로 만족하는 해는 일반적으로 존재하지 않는다. 이러한 경우에는 각각의 목적들 사이에 trade-off가 존재하게 되는데 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 일련의 서로 우열을 가릴 수 없는 해의 집합(파레토 최적해)이 존재하게 되는데 이것을 그림 1에 나타내었다. 본 연구에서 다루는 지진하중을 받는 스마트 면진장치를 제어하는 문제에 있어서는 trade-off가 면진층의 변위와 구조물의 절대가속도 사이에서 존재하게 된다. 따라서 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 최소화하는 것은 불가능하다.

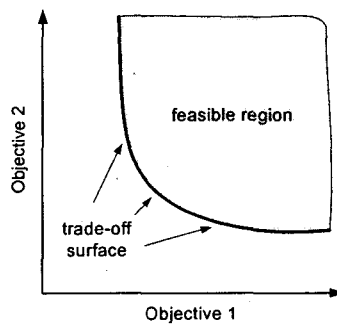


그림 1. 상충하는 목적사이의 trade-off

## 3. 비지배 정렬 유전자 알고리즘(NSGA-II)의 다목적 순위

MOGA와 하나의 목적을 가진 일반적인 유전자 알고리즘과의 가장 근본적인 차이점은 개체에 적합도를 부여하는 방법이다. MOGA에서 모든 개체는 각각의 목적에 대한 성능지수를 계산하여 벡터의 형태로 저장하게 된다. 이러한 벡터는 유전자알고리즘의 선택 연산자를 적용하기 위해서 스칼라 형태인 하나의 적합도 값으로 변환되어야 한다. 이러한 과정은 개체군에 포함된 모든 개체에 상대적인 순위를 부여하고 부여된 순

위에 근거하여 적합도를 결정함으로써 이루어진다. 각각의 개체는 파레토 지배(Pareto dominance)의 개념을 사용하여 비교된다. 이러한 개념은 Goldberg에 의하여 GA 분야에 처음으로 도입되었다.<sup>(4)</sup> 매 세대마다 개체군 안에서 비지배 개체를 다음과 같은 방법으로 찾을 수 있다. 두 개의 목적에 대한 최적화 문제를 생각해볼 때 만약 개체 'a'가 개체 'b'보다 두 목적에 대하여 모두 우수한 성능을 보인다면 개체 'a'는 개체 'b'를 '지배한다(dominate)'라고 한다. 만약 하나의 개체가 다른 개체에 의해서 지배당한다면 그 개체는 제외되고 그렇지 않으면 개체군에 남긴다. 개체군에 있는 모든 개체에 대해서 이러한 방법으로 비교를 하면 모든 남아있는 개체는 비지배 해가 되고 파레토 최적해 집합을 이룬다. 이렇게 남은 비지배 해(파레토 최적해)에 순위 1을 부여하고 원래의 개체군에서 임시로 지운다. 그리고 남아있는 개체들만을 이용하여 전술한 방법과 같이 비지배 개체들을 계산한다면 이렇게 결정된 비지배 개체들에는 순위 2가 부여될 수 있다. 모든 개체에 순위가 부여될 때까지 이러한 작업을 반복 수행한다면 그림 2와 같이 모든 개체에 순위가 부여된다.

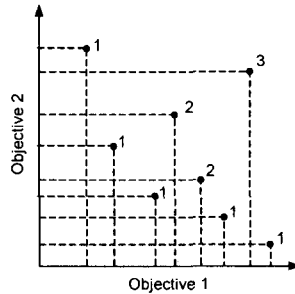


그림 2. 다목적 순위

#### 4. NSGA-II를 사용한 FLC의 최적화

##### 4.1 인코딩(encoding) 방법

본 논문에서 사용된 GA에서 각각의 개체들은 FLC를 나타내고 인코딩(encoding)은 이러한 FLC의 유전적 표현이라고 말할 수 있다. FLC를 구성하는데 필요한 모든 정보는 염색체(chromosome)라고 불리는 하나의 구조에 인코딩된다. 본 연구에서는 스마트 면진장치가 사용된 구조물의 제어를 위하여 두 개의 입력(면진된 구조물의 절대가속도와 면진층 변위)과 한 개의 출력(제어전압)으로 이루어진 FLC를 이용하였다. 모든 입력과 출력을 표현하기 위하여 가우스 소속함수를 사용하였다. 가우스 소속함수의 형태는 2개의 파라미터( $c$  and  $\sigma$ )를 정의함으로써 결정된다. 이 두 가지의 파라미터는 그림 3에서 보는 바와 같이 실수 표현방법으로 유전자에 인코딩된다. 그림 3에 나타난 인코딩 방법은 모든 염색체에 적용된다.

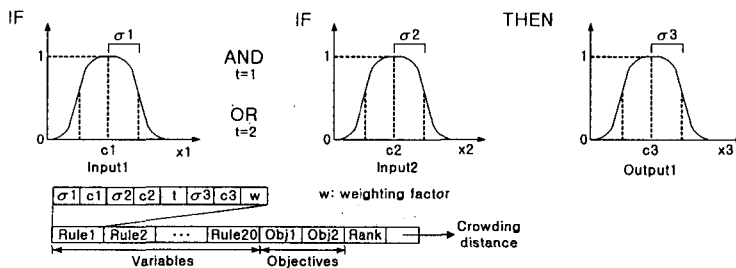


그림 3. NSGA-II에서 사용되는 염색체의 구조

#### 4.2 최적화의 다목적함수

GA에서 적합도 함수는 각각의 염색체의 성능을 평가하기 위하여 사용되는 주요한 지표이다. 본 연구에서는 스마트 면진장치를 제어할 FLC를 최적화하기 위해서 구조물의 최대응답을 목적함수로 이용하였다. 그리고 추가적으로 구조물의 RMS (root mean square) 응답도 목적함수에 포함함으로써 목적의 수를 늘려서 최적화 작업을 수행하여 보았다. 목적함수는 제어된 구조물의 응답을 제어하지 않았을 때의 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. 본 연구에서 사용된 목적함수를 표 1에 나타내었다. 여기서  $d$ 는 제어된 면진층 변위,  $\hat{d}$ 은 제어되지 않은 면진층 변위,  $a$ 는 제어된 가속도,  $\hat{a}$ 은 제어되지 않은 가속도,  $\sigma_d$ 는 제어된 RMS 면진층 변위,  $\sigma_{\hat{d}}$ 은 제어되지 않은 RMS 면진층 변위,  $\sigma_a$ 는 제어된 RMS 가속도,  $\sigma_{\hat{a}}$ 은 제어되지 않은 RMS 가속도를 각각 의미한다.

표 1. 다목적 최적화의 목적함수

내용	목적함수
Normalized Peak Base Drift	$f_{peak\_drift} = \max_{earthquakes} \left\{ \frac{\max_t  d(t) }{\max_t  \hat{d}(t) } \right\}$
Normalized Peak Acceleration	$f_{peak\_accel} = \max_{earthquakes} \left\{ \frac{\max_t  a(t) }{\max_t  \hat{a}(t) } \right\}$
Normalized RMS Base Drift	$f_{RMS\_drift} = \max_{earthquakes} \left\{ \frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{\hat{d}}(t)} \right\}$
Normalized RMS Acceleration	$f_{RMS\_accel} = \max_{earthquakes} \left\{ \frac{\sigma_a(t)}{\sigma_{\hat{a}}(t)} \right\}$

#### 5. 스마트 면진시스템

스마트 면진장치에 대한 일련의 실험이 최근에 NCREE에서 수행되었다. 이때 사용된 스마트 면진장치는 네 개의 FPS와 한 개의 300 kN MR 감쇠기로 구성되었으며 이를 그림 4에 나타내었다. 실험에서는 전문가의 지식에 근거하여 설계된 FLC를 이용하여 구조물의 가속도 증가 없이 면진층 변위를 성공적으로 줄일 수 있었다. 비록 전문가 지식에 근거한 FLC를 이용해서 스마트 면진장치를 효과적으로 제어했지만 최적화 설계 기법을 사용하면 보다 개선된 제어알고리즘을 개발할 가능성이 있다고 판단된다. 따라서 그림 4에 나타낸 스마트 면진장치 실험모델을 수치해석에서 사용하였다. 이 모델을 사용하여 보다 개선된 제어성능을 보이는 FLC를 제안하고자 한다. 여기서 MR 감쇠기과 FPS를 모형화 하기 위해서 ANFIS를 사용한 뉴로-퍼지 모형화 기법을 이용하였다.

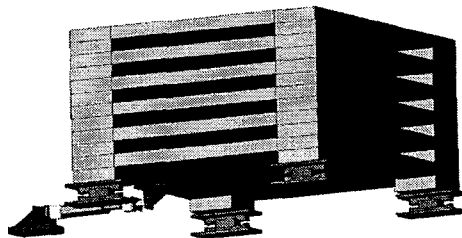


그림 4. 스마트 면진시스템의 구성

## 6. 비교대상 제어기

### 6.1 전문가 지식에 근거한 퍼지로지제어기

NSGA-II에 의하여 최적화된 FLC의 제어성능을 검증하기 위하여 NCREE 실험에서 사용된 전문가 지식에 근거한 FLC(Expert FLC)를 사용하였다. Expert FLC는 면진구조물의 절대가속도와 면진층 변위를 입력으로 사용하고 제어전압을 출력으로 사용한다. 가속도와 변위를 표현하기 위하여 5개와 6개의 소속함수를 각각 사용하였고 7개의 소속함수가 제어전압을 위하여 사용되었다. 사용된 FLC의 rule surface를 그림 5에 나타내었다.

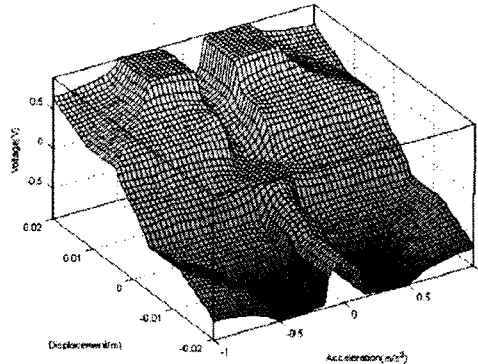


그림 5. Expert FLC의 rule surface

### 6.2 Skyhook 제어기

비교대상 준능동 제어기로서 skyhook 제어기를 또한 선택하였다. 일반적인 감쇠기는 대상구조물의 상대가속도를 주로 줄이려는 특성을 가지고 있는데 반하여 skyhook 제어기로 제어된 감쇠기는 구조물의 절대가속도를 줄이는데 뛰어난 성능을 보여준다. Skyhook 감쇠기의 감쇠계수를 최적화한다면 시스템의 공진주파수 근처의 응답이 줄어들 뿐만 아니라 고주파수대역의 응답 또한 어느 정도 줄일 수 있다. 본 연구에서 사용된 skyhook 알고리즘은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V(t) = \begin{cases} V_{\max} & \text{if } \dot{u}_a \dot{u}_r > 0 \\ V_{\min} & \text{if } \dot{u}_a \dot{u}_r < 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $V(t)$ 는 제어전압,  $V_{\max}$ 는 최고전압, 즉 1 volt,  $V_{\min}$ 은 최저전압, 즉 0. volt,  $u_a$ 는 절대속도,  $u_r$ 은 상대속도를 각각 의미한다.

## 7. 수치해석

지진하중이 가하여 졌을 때 스마트 면진장치의 동적응답을 수치해석을 통하여 예측하기 위해서 SIMULINK를 사용하였으며 이때 사용된 SIMULINK 모델의 블록 다이어그램을 그림 6에 나타내었다. 보다 사실적인 시뮬레이션을 위해서 quantization 에러와 A/D convertor 및 D/A convertor의 saturation, 그리고 계측잡음을 SIMULINK 모델에 추가하였다. 수치해석에 사용된 지진하중은 El Centro FN(1940), Kobe NS(1995) and Northridge FN(1994)의 세 가지 지진을 사용하였다. NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군

은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 500세대까지 수행하였다.

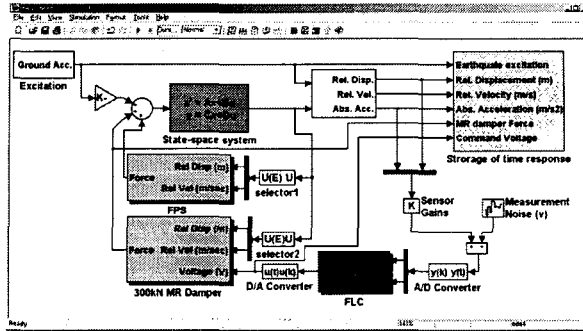
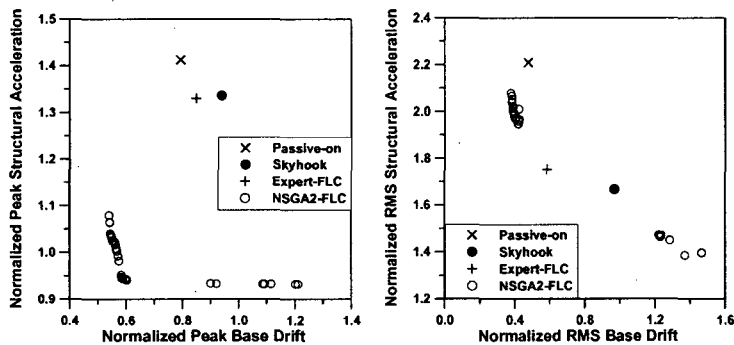


그림 6. SIMULINK 블록 다이어그램

본 논문에서는 표 1에서 나타낸 4가지의 목적함수를 이용하여 각각의 목적을 동시에 최소화시킬 수 있는 FLC를 설계하고자 한다. 4개의 목적함수 중에 우선 구조물 응답의 최대치를 나타내는 목적함수인  $f_{peak\_drift}$  와  $f_{peak\_accel}$  두 개만을 이용하여 FLC를 최적화하였고 그 결과를 비교대상 제어기들과 함께 그림 7에 나타내었다. 우선 비교대상 제어기들의 성능을 검토해 보자면, passive-on의 경우는 passive 제어 방법 중에서 면진층 변위를 최소화하는데 가장 효과적인 방법으로 생각할 수 있다. 예상한 바와 같이 그림 7 (a) 및 (b)의 그래프를 보면 최대 면진층 변위나 RMS 면진층 변위 모두 passive-on의 제어성능이 expert FLC나 skyhook 제어기에 의한 성능보다 더 뛰어난 것을 알 수 있다. 반면에 skyhook 제어기는 앞 절에서 설명한 특징대로 구조물의 절대 가속도에 대한 제어성능이 최대 응답과 RMS 응답 모두 passive-on의 경우보다 뛰어난 것을 알 수 있다. Expert FLC의 제어성능은 skyhook 제어기보다 더 많이 면진층 변위를 줄일 수 있고, passive-on보다 구조물의 절대 가속도를 더 효과적으로 줄일 수 있다. 이제 NSGA-II를 사용하여 최적화한 FLC의 성능에 대해서 살펴보면, 전술한 바와 같이 그림 7에 나타낸 결과는 최대 응답만을 최적화과정의 목적함수로 사용하였기 때문에 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 최대 응답의 제어성능은 비교대상 제어기에 비하여 월등히 좋은 것을 알 수 있다.



(a) 최대 응답

(b) RMS 응답

그림 7. 최대치 목적함수를 이용한 최적화 결과

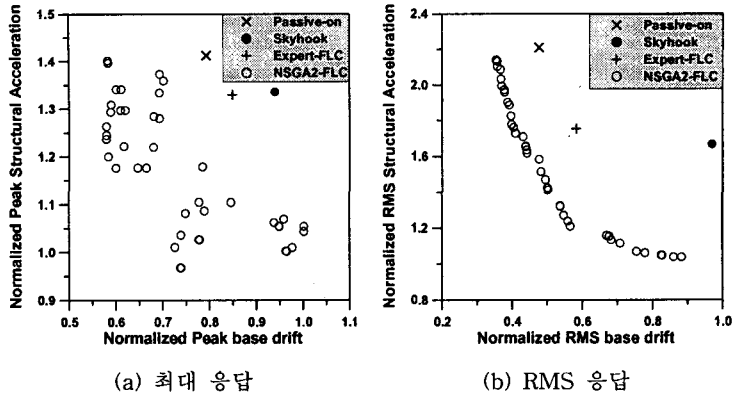


그림 8. RMS 목적함수를 이용한 최적화 결과

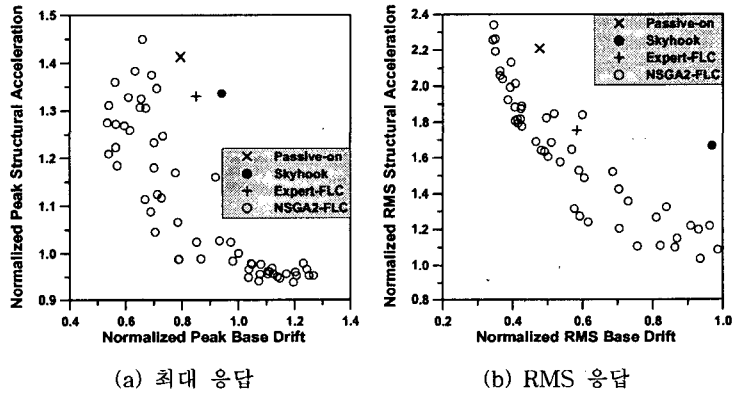


그림 9. 최대치 및 RMS 목적함수를 이용한 최적화 결과

그러나 이렇게 최대 응답은 최소화할 수 있지만 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 RMS 응답에 대해서는 그다지 좋은 제어성능을 제공하지 못하는 것을 알 수 있다. 그래프에는 NSGA-II를 사용하여 최적화하였을 때 500번째 세대의 개체군에서 비지배 개체들만을 나타내었다. 그림 7(b)를 보면 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 적절하게 줄일 수 있는 개체는 존재하지 않고 RMS 면진층 변위를 효과적으로 줄일 수 있는 개체군과 RMS 가속도를 효과적으로 줄일 수 있는 개체군으로 크게 나누어지는 것을 알 수 있다. 이것은 RMS 응답을 나타내는 목적함수를 최적화 과정에 포함시키지 않았기 때문이다. 이와는 반대로 RMS 응답만을 최적화문제의 목적함수로 사용하여 FLC를 최적화하였을 때의 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(b)의 RMS 응답을 보면 비교대상 제어기보다 더욱 우수한 제어성능을 발휘하는 여러 개의 개체(FLC)들이 존재하는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)에 비해하여 매우 개선된 FLC를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 FLC들의 최대 응답을 그림 8(a)에 나타내었다. 개체들의 제어성능이 최대 응답을 목적함수로 사용했을 때에 비하여 좋지는 않지만 우수한 RMS 응답 제어성능을 유지하면서 비교대상 제어기들 보다는 최대 응답을 더욱 효과적으로 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 마지막으로 표 1에서 소개한 4개의 목적함수를 모두 사용하여 FLC를 최적화하였을 때의 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 응답만을 목적함수로 사용하거나 RMS 응답만을 목적함수로 사용했을 때보다는 제어성능이 좋지 않지만 두 가지의 응답을 동시에 적절하게 제어할 수 있음을 알 수 있다. 최적화 후 얻은 비지배 개체수가 최대 응답만을 목적함수로 사용하였을 때에는 41개이고 RMS 응답만을 목적함수로 사용했을 때에는 43개인데 비하여 4개의 목적함수를 모두 사용하였

을 경우에는 73개이다. 이 수는 전체 개체군의 수(100개)에 비하여 상당히 크기 때문에 보다 다양한 해를 탐색하기가 어려워지고 유전알고리즘의 효율적인 수행에 문제가될 수 있다. 다목적 유전자 알고리즘을 사용하여 최적화 문제를 풀 경우에 목적의 수가 늘어나면 비지배 개체수가 늘어나게 되므로 지역 최적해에 빠지지 않고 보다 효율적으로 전체 최적해를 구하기 위해서는 개체군의 크기(population size)를 늘이는 것이 필요하다고 판단된다. RMS 응답에 관계없이 구조물의 최대응답만을 최소화시키기를 원한다면 그림 7(a)에 나타난 개체들 중에서 설계목적에 가장 적합한 제어를 엔지니어가 선택하는 것이 바람직하다고 판단된다. 그러나 최대응답에 대한 제어성능을 어느 정도 희생하더라도 RMS 응답을 적절한 수준으로 제어하고 싶다면 그림 9에 나타난 비지배 개체들 중에 가장 적절한 성능을 발휘하는 제어를 선택하는 것이 필요하다.

## 8. 결론

본 연구에서는 MR 감쇠기와 FPS로 구성된 스마트 면진장치의 제어를 위하여 MOGA로 최적화된 FLC의 제어 성능을 검토하여 보았다. 스마트 면진장치를 사용하여 면진된 구조물의 절대가속도와 면진층 변위를 줄이는 것을 다목적 문제의 목적함수로 사용하였고 NSGA-II를 이용하여 파레토 최적해 집합을 구하였다. NSGA-II를 사용하여 최적화를 수행을 한다면 이후에 얻어진 파레토 최적해 집합에서 엔지니어가 원하는 성능을 만족시키는 적절한 FLC를 선택할 수 있다. GA를 이용하여 다목적 문제를 푸는 전통적인 방법인 목적함수에 가중치를 주어서 합하는 방법(weighted sum approach)을 사용하여 최적해 집합을 구하고자 한다면 한 번의 최적화작업 수행으로 하나의 최적해만을 얻을 수 있기 때문에 가중치를 변경해가면서 여러 번의 최적화 작업을 반복적으로 수행하는 것이 필요하다. 그러나 NSGA-II를 사용하면 한 번의 최적화 작업으로 파레토 최적해 집합을 구할 수 있다. NSGA-II로 최적화된 FLC의 제어성능을 검토하기 위하여 passive-on, skyhook 제어기 그리고 expert FLC를 비교대상 제어기로 사용하였다. 본 논문에서는 스마트 면진장치를 제어할 FLC를 최적화하기 위해서 구조물의 최대 응답뿐만 아니라 RMS 응답도 목적함수로 이용하였다. 최대 응답만을 목적함수로 사용하거나 RMS 응답만을 목적함수로 사용했을 때는 목적으로 사용한 응답에 대해서는 비교대상 제어기에 비하여 월등한 제어성능을 보여주었다. 그러나 목적함수로 고려하지 않은 응답에 대해서는 그다지 좋지 못한 제어성능을 보여주었다. 최대 응답과 RMS 응답을 동시에 목적함수로 고려한 경우에는 모든 경우에서 비교대상 보다 뛰어난 성능을 발휘하는 FLC를 구할 수 있었다.

## 참고문헌

1. Symans, M.D. & Kelly, S.W., "Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation," *Earthquake Eng Struct Dyn*, 28, 1999, 37-60.
2. Liba, M., Fuzitani, H., Kitagawa, Y., Midorikawa, M., Kawamura, H. & Mochio, T., "Shaking table test on seismic response control system by fuzzy optimal logic," *Proceedings of the First World Conference on Structural Control*. Los Angeles (CA), 1994, 69-77.
3. Hans, A.E., "Multicriteria optimization for highly accurate systems," *Mathematical concepts and methods in science and engineering*, Plenum press, 19, 1988, 309-352
4. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reissue, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.